干旱区水电站建设运营生态环境影响遥感监测

马瑶瑶[1,2,3]，　史培军[1,2,3]，　徐　伟[1,2,3]，　张钢锋[1,2,3]

（1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京　100875；2. 应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院，北京　100875；3. 北京师范大学地理科学学部，北京　100875）

摘　要：水力发电是我国重要的清洁能源，然而水电站建设和运营周期长，其对生态系统的长期影响过程还不明确。尤其是干旱地区，因其特殊的地理位置与干旱少雨的气候条件，生态系统自我调节能力差，当地生态环境遭到破坏后往往难以修复。本文以我国干旱区典型水电站——龙羊峡水电站为例，利用Landsat系列卫星数据及陆地遥感产品，应用缓冲区分析、趋势性分析等方法，监测2000—2021年水电站周边生态环境并分析其对周边区域生态环境的影响。结果表明：（1）2000—2021年龙羊峡水电站周边土地利用的格局并未发生明显改变，草地面积相对占比轻微上升，其他类型土地利用占比轻微下降。（2）2000—2021年，龙羊峡水电站周边湿地面积显著增加。（3）龙羊峡水电站周边区域近20 a植被生长状况良好，植被覆盖度高值区域面积占比增大。（4）水电站周边区域植被固碳能力提升，随着湿地面积增速放缓，植被生产力逐渐恢复。

关键词：水电站；生态环境影响；植被覆盖度；土地利用类型；遥感监测

为减缓人为二氧化碳排放导致的全球气候变暖，我国2020年明确提出了力争在2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和的战略目标，其中，最重要的举措就是推动水力、太阳能、风能发电等新能源产业的快速发展[1]，加快传统能源向清洁能源的转型[2]。水力发电是各类可再生能源中最为稳定和可靠的[3]，但在水电站建设与运营过程中，会对周边区域的生态环境产生一定影响[4-6]。为实现水电站发展与生态环境保护的协同，监测并定量评估水电站的生态环境影响显得十分迫切。遥感技术具有监测范围广、信息精度高、获取速度快等优势，能够为生态环境影响监测提供更为客观精确的数据[3]，其可获得的时间序列也较长，能够很好的弥补部分地区监测站点的不足。

基于遥感技术对水电站周边区域的生态环境进行监测与评价，国内外已经开展了一系列研究。龚围等[3]以“一带一路”区域中国援建的水电站工程为研究对象，基于遥感对地观测数据，分析了水电站对库区周边植被生长状况与生态资源影响，发现10座水电站造成的生态损失与库区面积呈正相关，在植被覆盖度较低的地区水电站的修建会明显改善周边环境。Gan等[7]选取澜沧江上已建成的第一座大型水电站——漫湾电站为案例，通过对漫湾电站库区及周边遥感图像的技术处理，解决了常规方法在澜沧江梯级电站群峡谷山区植被覆盖调查中客观存在的困难。Lin等[8]以湄公河水电站为例，基于30 a Landsat时间序列和年度Landsat归一化差异植被指数（NDVI）复合以及数字高程模型（DEM）数据，开发了一种新的遥感方法来确定水电大坝的建设和完工时间并评估其对附近土地利用和土地覆被的影响距离。Mohamed等[9]将DEM与合成孔径雷达数据结合起来，监测地形、地质、水位等因素对水电站的影响，进而分析埃塞俄比亚的复兴大坝与肯尼亚埃瓦索—恩依罗大坝对周边环境的影响。Pang等[10]以二滩集水区为研究区域，基于多源遥感数据和DEM数据，利用遥感技术定量分析植被盖度变化和水土流失，进而综合评价水库集水区演化和发展趋势，结果表明二滩库区土壤流失情况正在向

收稿日期：2023-04-04；　**修订日期**：2023-06-11
基金项目：青海省重点研发与转化计划（2022-SF-173），国家自然科学基金项目（42101027），第二次青藏高原综合科学考察项目（019QZKK0606）
作者简介：马瑶瑶（2000-），女，硕士研究生，主要从事近地表风速时空变化及土壤风蚀研究. E-mail: 202221051206@mail.bnu.edu.cn
通讯作者：张钢锋. E-mail: gangfeng@bnu.edu.cn

好。Wan 等[11]以金沙江下游梯级水电站及其周边为研究区，提出了一种基于遥感的Bfast方法、Theil-Sen中位数方法和Mann-Kendall方法耦合的集成方法来识别NDVI突变的时间和幅度，进而确定和评估工程因素对植被动态的影响；结果表明，气候变化可能是促进区域植被生长的潜在因素，但水电站运行引起的植被生长速度更快。

总体而言，现有关于国内水电站的生态环境影响监测与评价主要是集中于南方湿润地区，而在西北干旱和半干旱地区的研究相对较少。干旱区大部分处于内陆地区，生态系统自我调节能力较差，生态环境较为脆弱[12]，其遭到破坏后修复难度更大。我国在干旱半干旱地区已经建设运营了龙羊峡水电站、公伯峡水电站、积石峡水电站等多座大型水电站，但目前水电站建设和长期运营对周边生态环境的影响过程尚不清楚。为此，本文以Landsat卫星系列为数据源，综合多个陆地遥感产品，以黄河上游修建运营时间较长的龙羊峡水电站为例，建立干旱区水电站生态环境影响监测体系和数据库，探究分析干旱区水电站的建设运营对周边生态环境的影响，以期为我国的水电产业高质量发展及生态保护提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

龙羊峡水电站位于青海省共和县与贵德县之间的黄河干流（图1）。龙羊峡水电站所处地区为高原大陆性气候，具有降雨少而集中、日照时间长、太阳辐射强等特点[13]。库区水位基本每年7月开始上升，在11月达到峰值，然后逐渐回落[14]。

龙羊峡水电站工程建设于1976年1月，1989年6月四台机组全部投产发电，是西北电网的主力电厂，电站建成后，总装机容量达128×10⁴ kW，多年平均发电量为59.42×10⁸ kW h。水电站以发电为主，兼顾灌溉、防讯、防凌的大型综合利用的水利枢纽工程，是黄河上游干流上第一座大型梯级电站，人称黄河“龙头”电站。

1.2　数据来源

本文使用的数据包括Landsat遥感影像数据、土地利用数据和NPP及GPP数据，其中：

（1）Landsat 数据，来源于地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）。包括Landsat 5 TM卫星数据（2000—2011年，空间分辨率30 m，重访周期18 d）及Landsat 8 OLI卫星数据（2013—2021年，空间分辨率为15 m，重访周期18 d）。

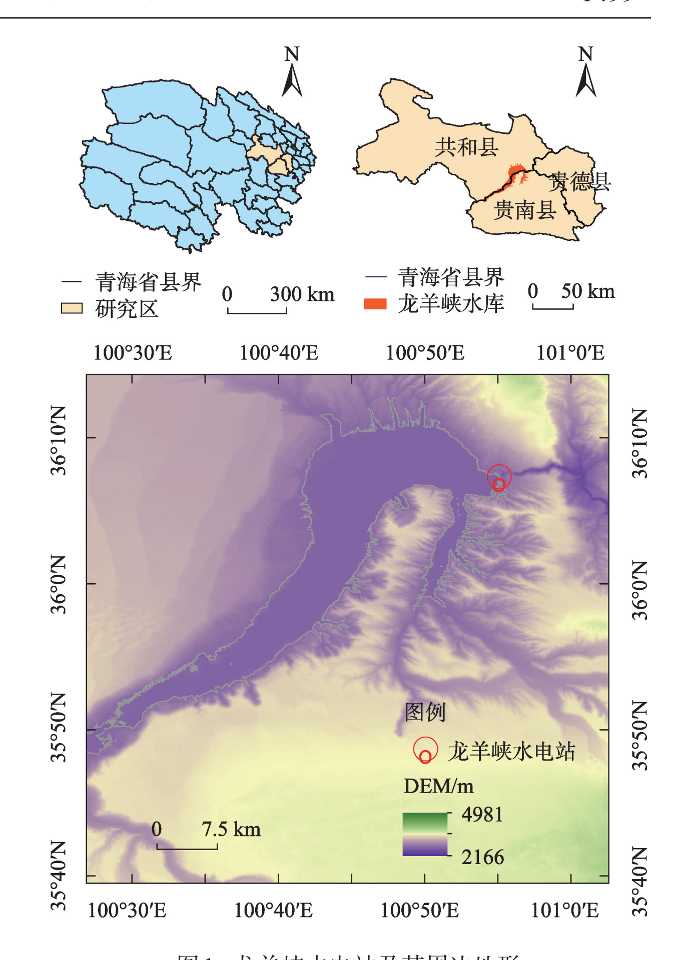


图1　龙羊峡水电站及其周边地形

Fig. 1　Longyangxia Hydropower Station and its surrounding terrain

（2）土地利用数据，中国多时期土地利用遥感监测数据集（CNLUCC），来源于资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn）[15]，该数据集基于美国陆地卫星Landsat TM影像，通过人工目视解译生成。目前有1980年、1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2013年、2015年、2018年和2020年10期。

（3）NPP和GPP数据，来源于USGS MOD17A3HGFv061数据集（https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgfv061），单位为kg C·m^{-2}·a^{-1}，空间分辨率为500 m，时间分辨率为年。

（4）NEP数据，来源于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn/）全球500 m年陆地生态系统净生产力产品（2000—2020年）；单位为kg

C·m^{-2}·a^{-1}，空间分辨率为500 m，时间分辨率为年。

1.3 研究方法

本文基于Landsat卫星数据，利用NDWI指数提取水域并计算2000—2021年龙羊峡水库面积、龙羊峡水电站附近的归一化差异植被指数(Normalized Difference Vegetation Index，NDVI)，进一步反演得到龙羊峡水库附近的植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover，FVC)，来对龙羊峡水电站周边植被生长状况进行分析；同时根据土地利用数据得出草地、水域、未利用土地、耕地、林地五类土地利用的占比变化情况，通过土地利用转移矩阵探究不同地类间的转换情况。利用缓冲区分析等方法探究龙羊峡水电站对周围湿地面积及植被生长状况的影响。同时用总初级生产力(Gross Primary Productivity，GPP)、净初级生产力(Net Primary Productivity，NPP)以及净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity，NEP)来评估龙羊峡水库周边植被生产力和固碳能力。本文的技术路线如图2所示。

1.3.1 湿地面积提取　本研究中的湿地定义是根据《中华人民共和国湿地保护法》第二条规定："本法所称湿地，是指具有显著生态功能的自然或者人工的、常年或者季节性积水地带、水域，包括低潮时水深不超过6 m的海域，但是水田以及用于养殖的人工水域和滩涂除外"，因此，在龙羊峡水电站周边区域的湿地面积主要为龙羊峡水库的面积。水库面积根据McFeeter等[16]提出的归一化差分水体指数(Normalized Difference Water Index，NDWI)计算得到。由于2012年的遥感影像数据缺失，本文对2012年的数据进行了线性插值，文中的湿地面积、NDVI均值、FVC值均为2011与2013年的平均值。

1.3.2 缓冲区分析方法　利用缓冲区分析方法研究龙羊峡水库周边的植被生长状况及土地利用变化情况，以指示距离水电站一定范围内的生态环境及生态资源利用情况。缓冲区分析方法是GIS中较为常用的一种邻域分析方法[17]。通常以特定的点、线、面为中心，设置一定距离的缓冲带，形成缓冲区多边形，从而排除其他信息的干扰，使得空间数据在二维空间内得以扩展的信息分析方法[18]。已有研究表明水电大坝对土地利用和土地覆盖的缓冲半径通常在坝上和坝下区域，分别为4.0 km和2.5 km[8]，综合考虑到龙羊峡水库边界及周边区域地理环境，本文设置的缓冲区为库区边缘向外3 km。

1.3.3 土地利用变化分析　本文使用的土地利用数据一级土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地共6个，二级类型25个。由于龙羊峡水库周边土地利用类型较少，居民用地少，本文主要分析水电站周边一级土地利用类型即耕地、林地、草地、水域、未利用土地5类土地利用占比

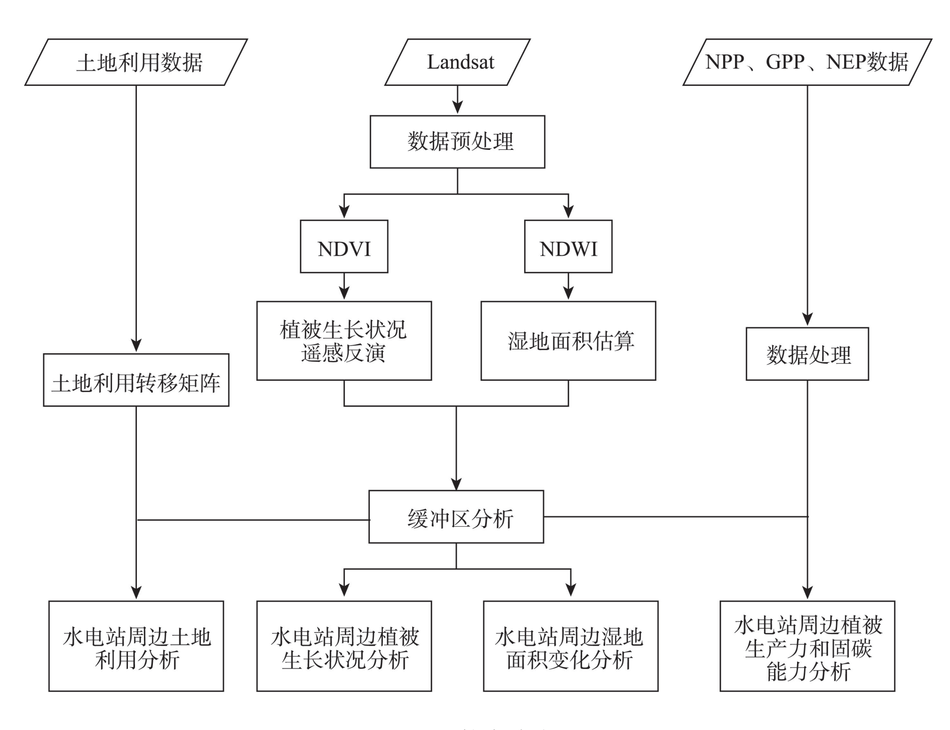


图2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

的变化情况。同时采用土地利用转移矩阵来反映某一区域两个时段各地类面积之间相互转化的动态过程信息[19]。

1.3.4　*植被生长状况反演*　植被生长状况参数主要包括归一化差异植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)、植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover,FVC)。植被覆盖度是指植被(如茎、叶、枝)在地面的垂直投影与研究区面积的比例[20],能够有效的反映植被变化特征和生态环境变化,是生态环境评价的重要指标。本文基于NDVI,根据二分模型计算区域内的植被覆盖度。公式如下:

$$\mathrm{FVC} = \frac{I - I_{\mathrm{soil}}}{I_{\mathrm{Veg}} - I_{\mathrm{soil}}}$$

式中:I为像元的NDVI值,I_{soil}为裸土覆盖时像元的NDVI值,I_{Veg}为全植被覆盖时的NDVI值。考虑到不同天然植被类型区域获取地面实测植被覆盖度数据进行数据检验的困难,本文选取NDVI累计频率5%的NDVI值作为I_{soil},累计频率的95%的NDVI值为I_{Veg}[20]。

2　结果与分析

2.1　水电站周边湿地面积变化

2000—2021年龙羊峡水库逐年的湿地面积及变化趋势如图3所示,2002年龙羊峡水库的湿地面积最小,为246.53 km²;2020年水库湿地面积最大,为394.91 km²。水库湿地面积整体在波动中上升,

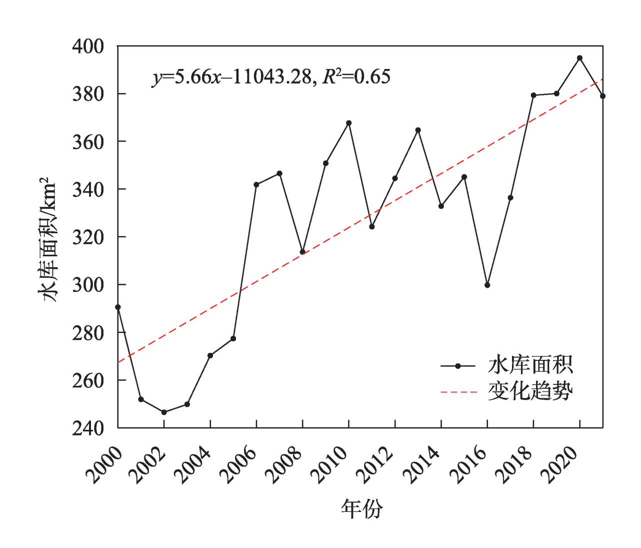


图3　2000—2021年龙羊峡水库湿地面积变化

Fig. 3　Changes in wetland area of Longyangxia Reservoir from 2000 to 2021

近20 a龙羊峡水电站周边的湿地面积增加趋势为5.66 km²·a⁻¹(P<0.05)。2000—2021年,龙羊峡水库湿地面积显著增加,水电站的建设与运营对湿地保护有促进作用。

2.2　水电站周边区域植被变化

2.2.1　*水电站周边区域植被覆盖度变化*　为评估水电站建设运营对周边区域植被覆盖度的影响,使用NDVI值反演得到FVC(植被覆盖度)并进行分级,划分为0%~10%、10%~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80%~100%共6个等级,用来分析近20 a不同等级的植被覆盖度变化情况。

由同一等级的植被覆盖度的多年变化来看(表1),与2000年相比,2020年0%~10%、10%~20%、20%~40%三个等级的植被覆盖度面积占比明显减少。2000—2020年,20%~40%植被覆盖度的平均减小幅度最大,为2.46%。而40%~60%、60%~80%、80%~100%植被覆盖度面积占比呈增加趋势,其中,60%~80%植被覆盖度的增加幅度最大,为1.71%。

图4为龙羊峡水电站周边区域2000年、2005年、2010年、2015年及2020年植被覆盖度空间分布。大部分地区植被覆盖度均较高,FVC高值区(0.8~1)主要分布于东北部及东南部的部分地区;西北部的植被覆盖度较南部低,大部分地区FVC值在0.4~0.6。2000—2020年,FVC高值区域的面积在持续增加,尤其西北部和东南部区域植被增长显著。

由水电站周边区域植被覆盖度长期变化趋势可知(图5),大于40%植被覆盖度的区域面积占比在逐渐增加,其中,60%~80%、80%~100%的植被覆盖度面积占比增加最为显著,变化趋势分别为0.61%·a⁻¹(P<0.05)、0.25%·a⁻¹(P<0.1),低于40%植被覆盖度的区域面积占比在逐渐减少,其中,20%~40%植被覆盖度的面积占比减少最为显著(−1.38%·a⁻¹,P<0.05)。值得注意的是,不同等级植被覆盖度面积在后期波动较大,例如2018年,0%~10%等级植被增长幅度接近30%,这可能与当年降水量偏低有关,表明研究区植被对气候变化较为敏感。在龙羊峡水电站的建设运营的多年间,整体植被覆盖度有所提升,大部分区域的FVC值较高,植被茂盛的区域面积占比不断增加。

2.2.2　*龙羊峡水库周边植被生长状况分析*　利用NDVI指数的变化来表示整体植被生长状况。完成湿地提取获得其边界信息后,利用缓冲区分析得到

表1 龙羊峡水电站周边区域不同等级植被覆盖度的占比

Tab. 1 The proportion of vegetation coverage of different grades in the surrounding area of Longyangxia Hydropower Station

年份	不同等级植被覆盖度占比/%					
	0%~10%	10%~20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	80%~100%
2000	2.18	18.11	49.85	20.45	6.11	3.37
2005	1.76	14.99	53.19	18.37	6.2	5.6
2010	1.28	3.91	45.02	29.45	12.1	8.35
2015	0.92	0.2	31.35	43.35	17.14	7.11
2020	0.14	0.03	0.56	37.43	40.41	21.46

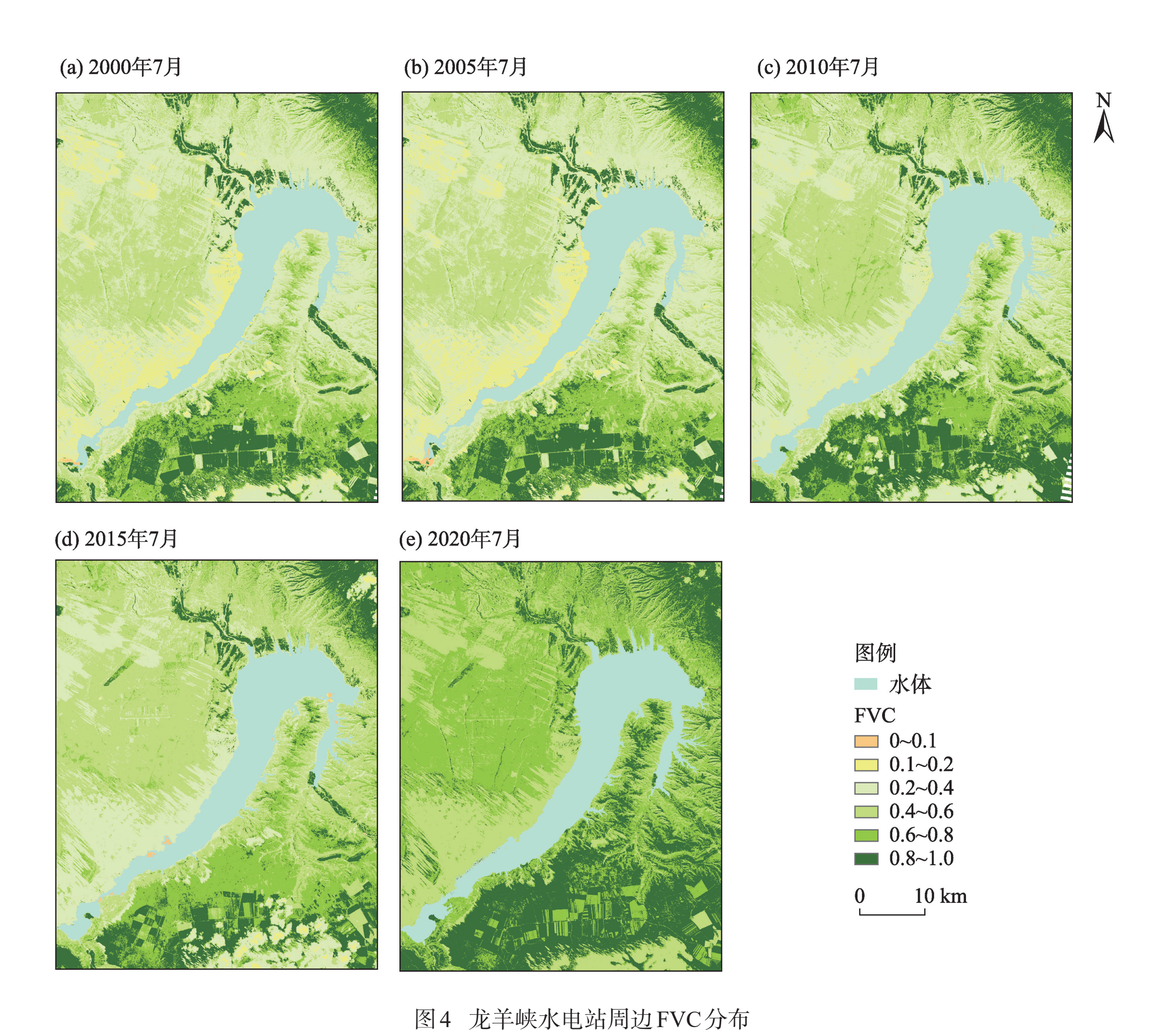


图4 龙羊峡水电站周边FVC分布

Fig. 4 FVC distribution around Longyangxia Hydropower Station

2000—2021年龙羊峡水电站周边3 km内的NDVI指数(图6),2000—2021年水库周边区域NDVI均值在2000年和2001年最小,为0.11,在2020年达到最大值,为0.29。整体而言,水库周边区域NDVI均值在显著上升,增加速率为每年0.007(P<0.05)。NDVI均值的变化表明,龙羊峡水电站周边区域的植被生长状况在不断变好。

从2000—2020年龙羊峡水电站周边NDVI空间分布可知(图7),龙羊峡水电站东部区域NDVI值较高,部分区域NDVI值可达到0.6~0.8,且植被覆盖较高区域分布更广;而水电站西部NDVI值较低,大部分区域NDVI值处于0~0.2。2000—2020年龙羊峡水电站周边区域整体植被生长状况在转好,尤其在西北部和东南部,植被整体变化更为明显。

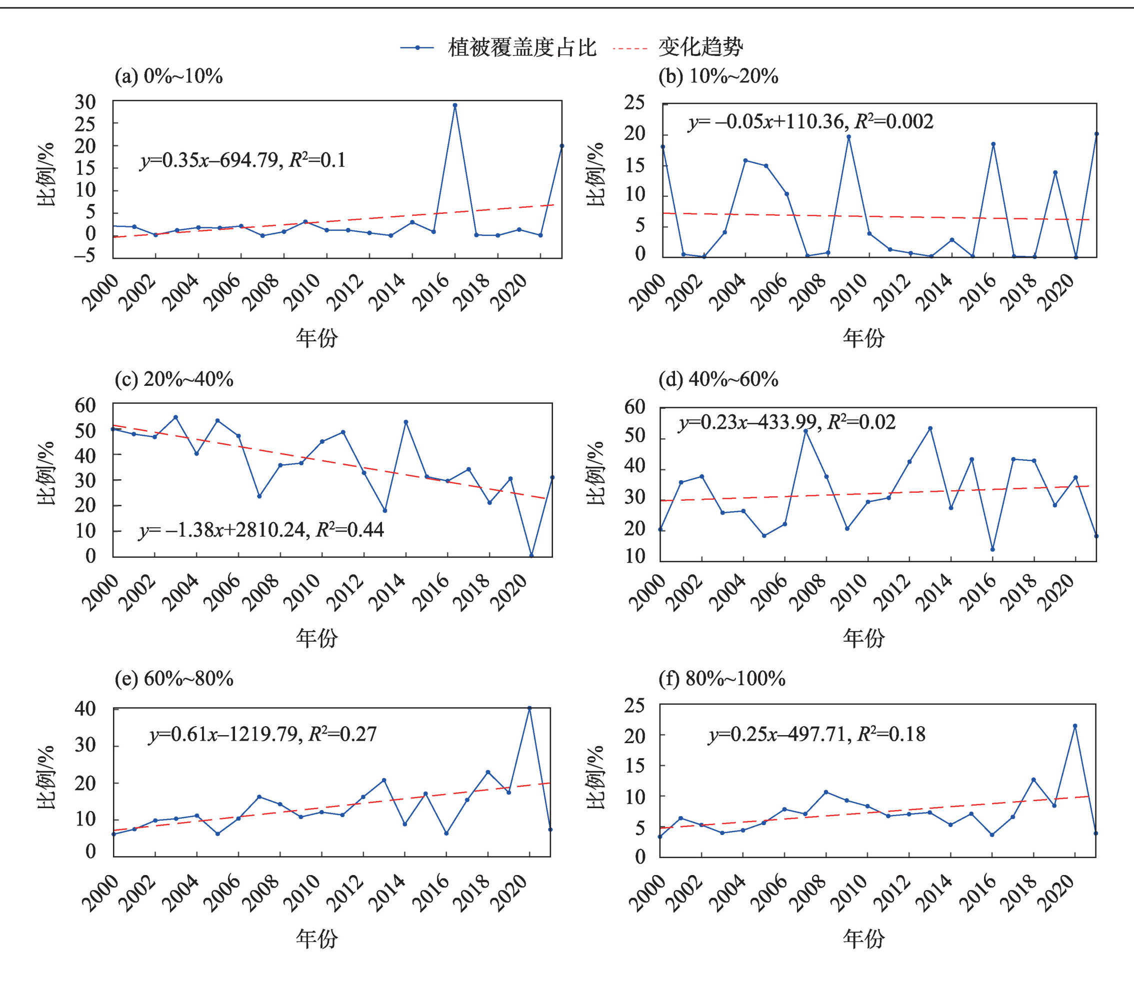


图5　2000—2021年不同等级植被覆盖度占比变化趋势

Fig. 5　The change trend of the proportion of vegetation coverage at different grades from 2000 to 2021

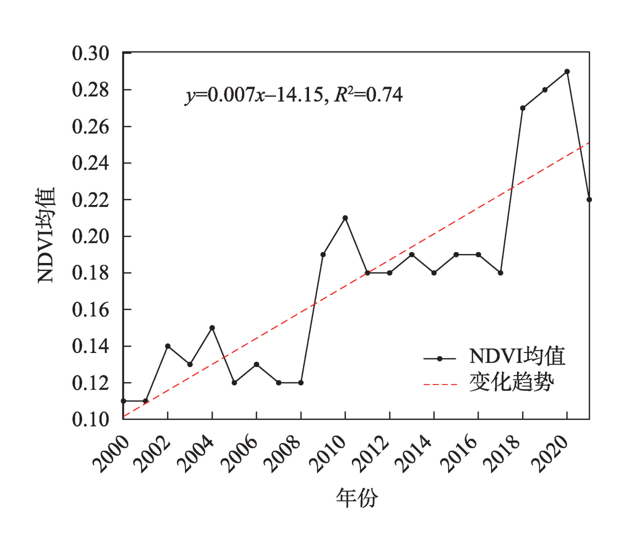


图6　2000—2021年龙羊峡水电站周边区域NDVI均值变化

Fig. 6　Average change of NDVI in the surrounding area of Longyangxia Hydropower Station from 2000 to 2021

2.3　龙羊峡水库周边植被生产力及固碳能力变化

总初级生产力(Gross Primary Productivity，GPP)是指单位时间内绿色植物通过光合作用途径所固定的有机碳量，其决定了进入陆地生态系统的初始物质和能量[21]。植被净初级生产力(Net Primary Productivity，NPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内所积累的有机干物质总量[22]，表示植被所固定的有机碳中减去本身呼吸消耗的部分，这一部分用于植被的生长和生殖。NEP(Net Ecosystem Productivity，NEP)是陆地生态系统的碳汇/碳源主要指标之一，代表生态系统的净碳通量[23]。

由图8可知，2001—2021年龙羊峡周边区域的植被总初级生产力(GPP)及净初级生产力(NPP)变化趋势一致。2001—2007年NPP、GPP呈现明显的下降趋势($P<0.05$)，分别为-0.04 kg C·m^{-2}·a^{-1}、-0.093 kg C·m^{-2}·a^{-1}，这一时期也是水电站蓄水面积开始快速增加的阶段，表明水电站前期蓄水过程会淹没部分草地，减弱周边植被的光合作用进而降低植被生产力。2007—2021年水电站周边植被的净初级生产力和总初级生产力呈现微弱的增加趋势，且在2016年达到最大值，分别为0.4 kg C·m^{-2}·a^{-1}、

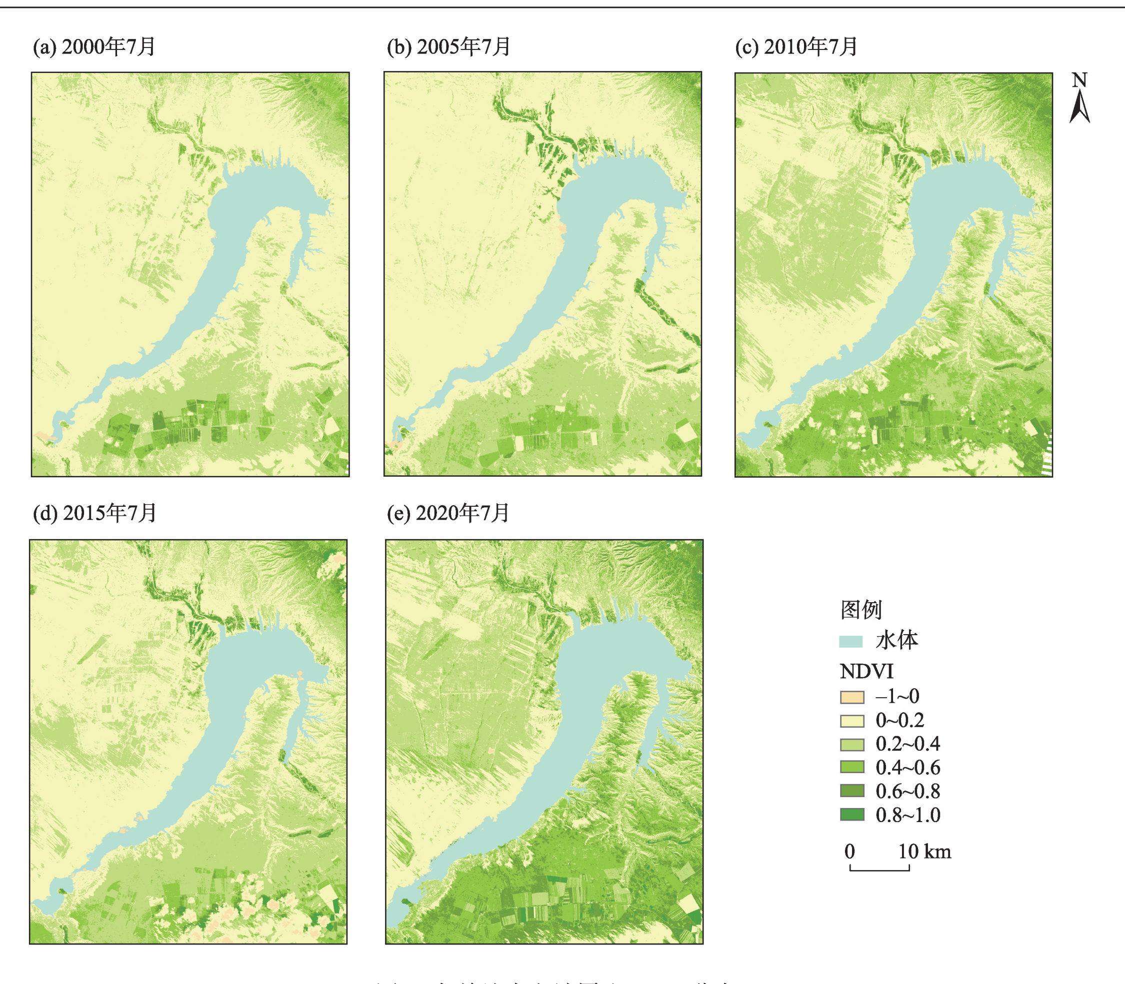


图7 龙羊峡水电站周边NDVI分布

Fig. 7 NDVI distribution around Longyangxia Hydropower Station

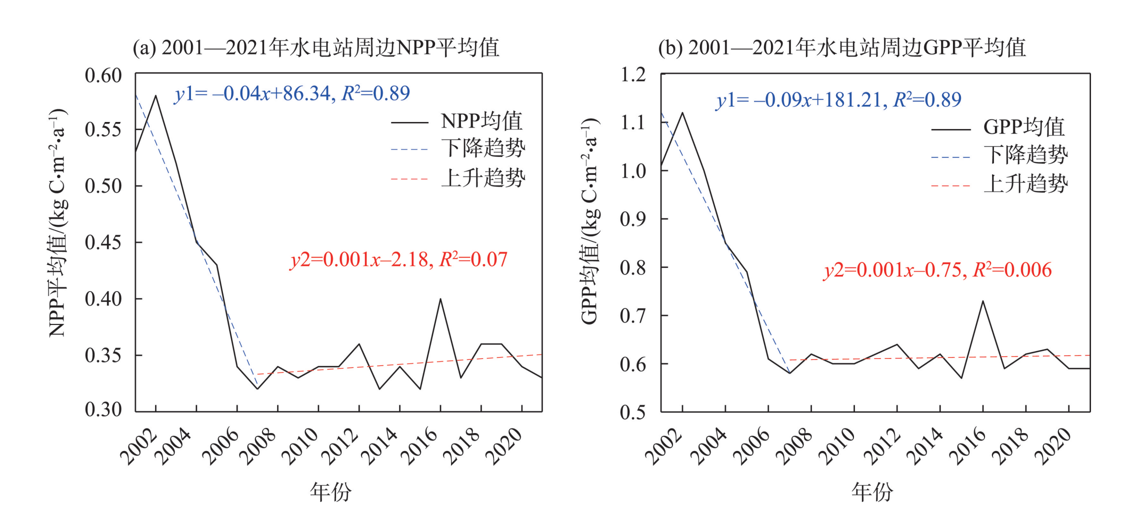


图8 2001—2021年龙羊峡水电站周边NPP(a)和GPP(b)平均值变化

Fig. 8 Average changes of NPP (a) and GPP (b) around Longyangxia Hydropower Station from 2001 to 2021

0.73 kg C·m^{-2}·a^{-1}，但还是远低于2000年的NPP(0.53 kg C·m^{-2}·a^{-1})和GPP(1.01 kg C·m^{-2}·a^{-1})。

2000—2020年龙羊峡周边区域NEP平均值呈显著上升趋势(图9)，变化率为0.003 kg C·m^{-2}·a^{-1}。综合NPP、GPP及NEP的变化趋势，2000—2007年为龙羊峡水库面积增长的快速期，水域的增加淹没周围部分植被和土壤，因此，植被生产力(GPP、NPP)下降，同时周围异养生物的呼吸减弱的速率较

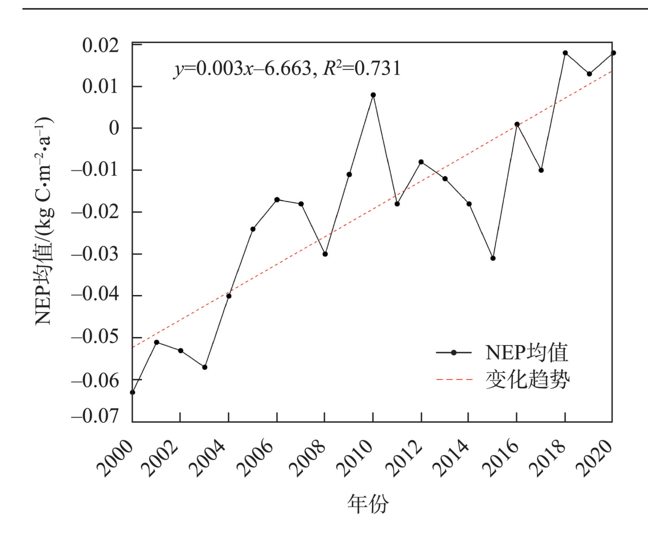


图9 2000—2020年龙羊峡水电站周边NEP平均值变化

Fig. 9 Changes of NEP average value around Longyangxia Hydropower Station from 2000 to 2020

快,故而NEP逐年增加;2008—2021年水库面积增速减缓,水库面积趋于稳定,尽管土壤异养生物的呼吸有所恢复,但仍低于GPP、NPP的增加趋势,因此,NEP也呈显著的上升趋势。在2016年后,NEP大于0,这意味着龙羊峡水库周边区域由碳源转变为碳汇,表明水电站蓄水稳定后,周边植被光合作用和固碳能力会逐渐恢复,但恢复过程较慢。

2.4 水电站周边区域土地利用变化

通过对龙羊峡水电站周边的土地利用变化情况进行分析,统计2000—2021年土地利用类型占比变化。由于土地利用情况在短期变化较小,因此,本文选取2000年、2005年、2010年、2015年、2020年五期不同土地利用类型的占比情况进行研究分析,结果如表2所示。

由表2可知,2000—2020年龙羊峡水电站周边土地利用类型占比总体并未发生较大的变化,大部分区域以水域和草地为主。2020年不同土地利用类型占比相对2000年变化幅度均较小,其中草地占比有了轻微的上升,由42.73%上升到45.55%,耕地和水域占比略有减少,减少幅度分别为1.37%和1.33%,其他类型的土地利用占比变化不明显。

进一步利用转移矩阵表示2000年与2020年水电站周边区域土地利用的具体变化情况(表3),从转入转出的各类土地利用面积得出,2020年草地面积较2000年小,为360.97 km^2,林地面积未发生变化,水域面积增加显著,增长了54.13 km^2。草地、耕地及未利用土地转变为水域,使得龙羊峡水库的面积增加。同时,草地大部分转变为水域和未利用土地,这是草地面积下降的主要原因。

3 讨论

龙羊峡水电站周边的生态环境主要受气候变化及人类活动的影响,在气候变暖的背景下,中国西北地区的植被在过去几十年逐渐恢复[24-26],主要

表2 2000—2020年不同土地利用类型占比变化

Tab. 2 Changes in the proportion of different land use types from 2000 to 2020

土地利用类型	面积占比/%				
	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
耕地	3.34	3.48	3.66	3.56	1.97
林地	0.22	0.11	0.09	0.09	0.17
草地	42.73	41.46	46.3	45.07	45.55
水域	33.69	35.17	28.99	31.48	32.36
未利用土地	20.02	19.78	20.96	19.8	19.95

表3 2000—2020年的土地利用转移矩阵

Tab. 3 Land use transfer matrix from 2000 to 2020 /km^2

2000年	2020年					
	草地	耕地	林地	水域	未利用土地	2000年转出
草地	303.15	8.2	0.86	35.34	47.47	91.87
耕地	6.12	8.46	0	9.93	6.49	22.54
林地	1	0	0.98	0.02	0	1.02
水域	11.61	0.04	0	294.03	7.16	18.81
未利用土地	39.1	1.83	0.15	27.65	107.98	68.73
2020转入	57.83	10.06	1.02	72.94	61.13	

由自然因子和人为因子共同驱动[27]。然而对于水电站及其周边区域而言，水电站蓄水后，夏季平均气温下降，冬季增温幅度较大[28]，温度变化幅度减小有利于植物生长；由于水域面积激增，下垫面热容量增加，大气层结稳定性强，云量下降，日照时数增加[28]，植物接收的太阳辐射增加；相对湿度下降[28]，蒸腾作用缓和，更多水分可用于光合作用及植物生长；总体而言，水电站的蓄水过程为植物生长提供了有利条件。且龙羊峡周边区域植被的改善速率高于同期其他区域[29]，表明同期气候变化对水电站周边生态环境的影响相较于水电站建设运营小。其他人类活动也可能对周边生态环境的改善发挥作用，例如退耕还林还草等政策，但其对周边植被的影响应该是出现突变，根据周边地区土地利用变化来看，耕地、草地占比的变化幅度较小，因此龙羊峡周边生态环境的变化很大程度上是水电站的建设运营引起[30]。未来需要利用更精细数据和气候生态耦合模型，进一步量化自然气候变化和人为水电站建设运营对生态环境变化的贡献率。

建设工程的施工运营过程都难以避免对周边区域植被生长状况、土地利用等生态环境造成影响[31]。本文以龙羊峡水电站为例，开展了干旱区水电站建设运营的生态影响遥感监测研究，经过分析发现龙羊峡水电站的建设运营总体有益于植被生长和湿地面积增长。实际上，水电站建设运营对水质以及生物洄游模式、鱼类种群活动[5]、鱼类死亡率和伤害[32]、生物多样性[33]均会造成一定的影响，今后需要进一步考虑这些因素，以深入理解和全面评估水电站建设运营对周边生态环境的影响。

缓冲区的建立中，水库的范围为当年的水库边界，土地利用中的总面积为龙羊峡水库面积及周边3 km的范围，这也能很好的解释表3中湿地面积增大而水域占比下降的情况。本文的研究结果表明在干旱区开展水电建设运营有利于周边的生态环境的整体改善，具有良好的生态效益，对我国加快能源结构由化石燃料向清洁能源的转变、促进经济快速发展生态环境保护的协同具有重要意义。

4 结 论

本文以Landsat卫星系列为数据源，综合多个陆地遥感产品探究分析干旱区水电站的建设运营对周边生态环境的影响，主要研究结论如下：

（1）龙羊峡水电站的建设运营对湿地保护有促进作用，2000—2021年龙羊峡水库面积显著增加，变化率为5.66 $km^2 \cdot a^{-1}$。

（2）水电站运营过程（蓄水）为植被生长提供了有利条件。周边区域近20 a来FVC高值区域面积所占比重有所增加，其中，60%~80%植被覆盖度的面积占比最高且增加趋势显著，变化率为0.61%$\cdot a^{-1}$。与此同时，龙羊峡水电站NDVI均值增加了一倍，植被生长状况趋好。

（3）2000—2020年水电站周边区域的植被固碳能力有所提升，特别是2016年后由碳源转变为碳汇，且随着水库面积趋于稳定，植被生产力（GPP、NPP）逐渐恢复且有不显著的上升趋势。

（4）水电站建设运营并未改变周边区域土地利用类型总体格局，在近20 a，土地利用类型面积占比从大到小依次为：草地、水域、未利用土地、耕地、林地，除草地占比轻微上升，耕地和水域占比略有减少外，其他类型的土地利用占比变化不明显。

参考文献（References）：

[1] 曹霞. 碳达峰碳中和背景下我国新能源产业发展与升级[J]. 中国市场, 2022, 29(34): 60-62. [Cao Xia. The development and upgrading of China's new energy industry under the background of carbon peak carbon neutrality[J]. China Market, 2022, 29(34): 60-62.]

[2] Lu Y C, Dai J Q, Wang L N, et al. The impact of the energy transition on China's economy under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Thermal Science, 2022, 26(5): 4043-4056.

[3] 龚围, 李丽, 柳钦火, 等. "一带一路"区域水电站工程生态环境影响遥感监测[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(7): 1424-1436. [Gong Wei, Li Li, Liu Qinhuo, et al. Remote sensing monitoring of ecological environment impact of hydropower station project in 'Belt and Road' region[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(7): 1424-1436.]

[4] Wang W Q, Wang H M, Liu G, et al. Analysis of the trade-off between hydroelectricity generation and ecological protection from the perspective of eco-efficiency in Southwest China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 315: 115063.

[5] Costea G, Pusch M T, Banaduc D, et al. A review of hydropower plants in Romania: Distribution, current knowledge, and their effects on fish in headwater streams[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 145: 111003.

[6] Kuriqi A, Pinheiro A N, Sordo-Ward A, et al. Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 142: 110833.

[7] Gan S, Yuan X, He D. Study on aplication of remote sensing moni-

toring vegetation cover around the manwan Hydropower Station[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3): 60-63.

[8] Lin Z H, Qi J G. A new remote sensing approach to enrich Hydropower Dams' information and assess their impact distances: A case study in the Mekong River Basin[J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): rs11243016.

[9] Mohamed M M, Elmahdy S I. Remote sensing of the Grand Ethiopian Renaissance Dam: A hazard and environmental impacts assessment[J]. Geomat Nat Hazards Risk, 2017, 8(2): 1225-1240.

[10] Pang Z G, Ge D X, Fu J E. Eco-environment evolvement analysis of Ertan reservoir catchment based on remote sensing[J]. Science China Technological Sciences , 2011, 54: 95-100.

[11] Wan H, Xie Y, Li B, et al. An integrated method to identify and evaluate the impact of hydropower development on terrestrial ecosystem. Environmental impact assessment review[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 99: 107042.

[12] 唐克旺, 王研, 王芳, 等. 西北地区生态环境现状和演化规律研究[J]. 干旱区地理, 2002, 25(2): 132-138. [Tang Kewang, Wang Yan, Wang Fang, et al. Analysis on the present situation and evolution of the ecological environment in Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(2): 132-138.]

[13] 韩辉邦, 马明国, 马守存, 等. 近30 a青海省植被变化及其气候驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1164-1174. [Han Huibang, Ma Mingguo, Ma Shoucun, et al. Analysis of vegetation change and its climate driving factors in Qinghai Province in recent 30 years[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1164-1174.]

[14] 张永荥, 张生鹏, 贡宝扎西, 等. 基于BDS及InSAR的龙羊峡水电站库区地表形变研究[J]. 全球定位系统, 2021, 46(6): 25-29, 43. [Zhang Yongxing, Zhang Shengpeng, Gongbao Zhaxi, et al. Study on surface deformation of Longyangxia hydropower station reservoir area based on BDS and InSAR[J]. GNSS World of China, 2021, 46(6): 25-29, 43.]

[15] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUCC)[DB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统, 2018. doi: 10.12078/2018070201. [Xu Xinliang, Liu Jiyuan, Zhang Shuwen, et al. Remote sensing data set of multi-period land use monitoring in China (CNLUCC)[DB/OL]. Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, 2018. doi: 10.12078/2018070201.]

[16] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 17(7): 1425-1432.

[17] Chen Q, Liu G. Research on irregular buffer generation algorithm with constraint conditions[J]. Geological Science and Techology Information, 2014, 33(4): 213-218.

[18] 段晋芳, 郭青霞, 解鸿志. 基于GIS的山西永定河植被生态需水管理系统的研建[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 254-258. [Duan Jinfang, Guo Qingxia, Xie Hongzhi. Research and construction of vegetation ecological water requirement management system of Shanxi Yongding River based on GIS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 254-258.]

[19] Qiao W, Sheng Y, Fang B, et al. Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: A case study of Suzhou, Jiangsu Province[J]. Geographical Research, 2013, 32(8): 1497-1507.

[20] 李春娥, 马静, 何芷. 伊犁河谷天然植被覆盖度的变化特征分析[J]. 地理空间信息, 2022, 20(2): 84-88. [Li Chun'e, Ma Jing, He Zhi. Analysis of variation characteristics of natural vegetation coverage in Yili River Valley[J]. Geospatial Information, 2022, 20(2): 84-88.]

[21] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的"4P"概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 47(4): 414-419. [Fang Jingyun, Ke Jinhu, Tang Zhiyao, et al. The concept, estimation and relationship of '4P' of biological productivity[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 47(4): 414-419.]

[22] 徐勇, 黄雯婷, 郑志威, 等. 基于空间尺度效应的西南地区植被NPP影响因子探测[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 900-911. [Xu Yong, Huang Wenting, Zheng Zhiwei, et al. Detection of vegetation NPP influencing factors in Southwest China based on spatial scale effect[J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 900-911.]

[23] 曹云, 张称意, 孙应龙, 等. 2000—2020年华北地区植被固碳能力的时空变化特征及其气象影响分析[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3488-3499. [Cao Yun, Zhang Chengyi, Sun Yinglong, et al. Spatio-temporal variation characteristics of vegetation carbon sequestration capacity and its meteorological influence in North China from 2000 to 2020 were analyzed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3488-3499.]

[24] 戴声佩, 张勃, 王海军, 等. 中国西北地区植被覆盖变化驱动因子分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 636-643. [Dai Shengpei, Zhang Bo, Wang Haijun, et al. Driving factors analysis of vegetation cover change in Northwest China[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(4): 636-643.]

[25] 代子俊, 赵霞, 李冠稳, 等. 基于GIMMS NDVI 3 g. v1的近34年青海省植被生长季NDVI时空变化特征[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 713-725. [Dai Zijun, Zhao Xia, Li Guanwen, et al. Based on GIMMS NDVI 3g. v1, the spatial and temporal variation characteristics of NDVI in vegetation growing season in Qinghai Province in recent 34 years were analyzed. [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(4): 713-725.]

[26] 李璠, 徐维新. 2000—2015年青海省不同功能区NDVI时空变化分析[J]. 草地学报, 2017, 25(4): 701-710. [Li Fan, Xu Weixin. Analysis of spatial and temporal variation of NDVI in different functional areas of Qinghai Province from 2000 to 2015[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(4): 701-710.]

[27] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 11-21. [Yin Zhenliang, Feng Qi, Wang Lingge, et al. Vegetation cover change and its influencing factors in Northwest China from 2000 to 2019[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 11-21.]

[28] 隋欣, 杨志峰. 青藏高原东部龙羊峡水库气候效应的变化趋势

分析[J]. 山地学报, 2005, 23(3): 280−287. [Sui Xin, Yang Zhifeng. Trend analysis of climate effect of Longyangxia Reservoir in eastern Qinghai- Tibet Plateau[J]. Mountain Research, 2005, 23(3): 280−287.]

[29] 牟乐, 芦奕晓, 杨惠敏, 等. 1981—2015年中国西北牧区植被覆盖的时空变化[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 615−623. [Mou Le, Lu Yixiao, Yang Huimin, et al. Spatio-temporal changes of vegetation coverage in pastoral areas of Northwest China from 1981 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 615−623.]

[30] 马昊翔, 陈长成, 宋英强, 等. 青海省近10年草地植被覆盖动态变化及其驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 137−145. [Ma Haoxiang, Chen Changcheng, Song Yingqiang, et al. Analysis of dynamic changes and driving factors of grassland vegetation coverage in Qinghai Province in recent 10 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 137−145.]

[31] 左文波, 黎杰俊, 欧阳园兰, 等. 江西官山国家级自然保护区水电站的生态影响及其修复治理[J]. 江西科学, 2019, 37(6): 943−947. [Zuo Wenbo, Li Jiejun, OuYang Yuanlan, et al. Ecological impact and restoration of hydropower station in Guanshan National Nature Reserve of Jiangxi Province[J]. Jiangxi Science, 2019, 37(6): 943−947.]

[32] Mueller M, Knott J, Pander J, et al. Experimental comparison of fish mortality and injuries at innovative and conventional small hydropower plants[J]. Journal of Applied Ecology, 2022, 59(9): 2360−2372.

[33] Lange K, Meier P, Trautwein C, et al. Basin-scale effects of small hydropower on biodiversity dynamics[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2018, 16(7): 397−404.

Remote sensing monitoring of the ecological environment of hydropower station construction and operation in arid areas：A case study of Longyangxia Hydropower Station

MA Yaoyao[1,2,3], SHI Peijun[1,2,3], XU Wei[1,2,3], ZHANG Gangfeng[1,2,3]

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China；2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing 100875, China；3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Hydropower is an important clean energy source in China. However, the construction and operation cycles of hydropower stations are long, and their long-term impact on the ecosystem is unclear. In arid areas, with their unique geographical location and dry climate, ecosystems often have limited self- regulation abilities, making restoring the local ecological environment after damage challenging. This study focuses on Longyangxia Hydropower Station, a representative hydropower station in an arid region of China, and uses Landsat series satellite data and land remote sensing products to monitor the ecological environment surrounding the hydropower station from 2000 to 2021. The study employs buffer zone and trend analyses to assess the impact on the ecological environment arounding the Hydropower. The results indicate the following: (1) The land use pattern around Longyangxia Hydropower Station did not change significantly from 2000 to 2021. However, the proportion of grasslands increased slightly, while that of other land use types decreased slightly. (2) During the same period, the wetland area around Longyangxia Hydropower Station increased significantly. (3) The vegetation in the surrounding area of Longyangxia Hydropower Station showed good growth over the past two decades, with an increase in the proportion of areas with high vegetation coverage. (4) The carbon sequestration capacity of vegetation in the vicinity of the hydropower station improved, and vegetation productivity gradually recovered as the growth rate of the wetland area decreased.

Keywords: hydropower stations; ecological environment impact; vegetation coverage; land use types; remote sensing; monitoring